

Evaluation of influence of selected nozzles' constructional parameters on emission of toxic compounds in compression ignition engines

Abstract: The subject of this paper is an analysis of the possible improvement in the ecological factors for the compression ignition engines. Two types of nozzles, which have a different in number of holes and its diameters, were used during investigation. The measure that has enabled the problem to be explored is a detailed analysis of spraying the diesel fuel. Examinations were realized on two types of stands. The stage of the visualization examinations carried out on the stand outside the engine was the first part of the examinations. "The engine response" to the suggested changes was tested during the engine examinations (second stage of examinations). Obtained results have confirmed a chance of an effective improvement in the indexes of emission formed in compression ignition engine.

Key words: ecology, toxic compounds emission, nozzle's construction, CI engines

Ocena wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych rozpylaczy na emisję związków toksycznych w silnikach o zapłonie samoczynnym

Streszczenie: Przedmiotem niniejszej pracy jest analiza możliwości poprawy wskaźników ekologicznych silników o zapłonie samoczynnym. W badaniach wykorzystano dwa rozpylacze różniące się liczbą otworków rozpylających i ich średnicą. Środkiem pozwalającym na zgłębienie zagadnienia była szczegółowa analiza rozpylenia oleju napędowego. Badania wykonano na dwóch rodzajach stanowisk badawczych. Pierwszą część badań stanowił etap badań wizualizacyjnych przeprowadzony na stanowisku pozasilnikowym. W fazie badań silnikowych (drugi etap badań) dokonano sprawdzenia „odpowiedzi” silnika na zaproponowane zmiany. Otrzymane rezultaty potwierdziły możliwość poprawy wskaźników emisyjnych silników o ZS.

Słowa kluczowe: ekologia, emisja związków toksycznych, konstrukcja rozpylacza, silniki o ZS

1. Wprowadzenie

Aby poprawić wymieszanie paliwa z powietrzem coraz częściej w nowo konstruowanych układach zasilania wykorzystuje się rozpylacze o zwiększonej liczbie otworków. Obecność dodatkowych strug skutkuje lepszym rozprzestrzenianiem się wypływającego paliwa w komorze spalania. Przy zwiększaniu liczby otworków zwiększa się tym samym wielkość sumarycznego przekroju przepływowego paliwa z rozpylacza. Dlatego też, należy pamiętać również o zmniejszeniu średnicy każdego z otworków rozpylacza. Opiswane wielkości należy przy tym dobierać bezpośrednio do komory spalania – zmniejszenie średnic otworków powoduje zwiększanie prędkości wypływu strugi paliwa, co może skutkować jej wydłużeniem. Zwiększony zasięg czoła strugi może powodować trafiające cząstek paliwa na ścianki komory spalania, co w niekorzystny sposób odbija się na emisji związków szkodliwych.

W pracy postanowiono zbadać wpływ liczby otworków rozpylających i_r , a tym samym ich średnicy d_o na osiągnięte parametry emisyjne silnika o

zapłonie samoczynnym. Wykorzystano 2 rozpylacze, z czego jeden posiadał większą liczbę kanałków wylotowych (rozpylacz nr 7), ale jednocześnie średnica każdego z otworków była mniejsza w stosunku do otworków rozpylacza drugiego (rozpylacz 3). Zestawienie szczegółowe parametrów konstrukcyjnych obu rozpylaczy zamieszczono w tablicy 1.

Tablica 1.
Parametry konstrukcyjne rozpylaczy nr 3 i 7

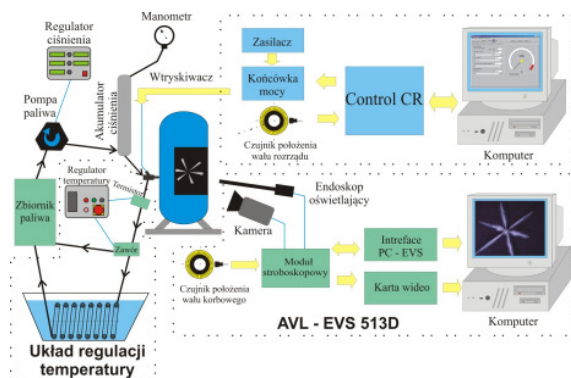
oznaczenie rozpylacza	typ: St – studzienka BS – bez studzienki	liczba otworków i_r	średnica otworków d_o (mm)	rodzaj wykonania kanałków wtryskowych: W – walcowe S – stożkowe	średnica gniazda przyłgni iglicy d_g (mm)	typ wykonania iglicy: ścięcie na ϕ 0,2 mm lub stożek na ϕ 1,1 mm (95°)
3	BS	7	0,18	W	2,1	95°
7	BS	8	0,225	W	2,1	95°

Badania zostały podzielone na dwa etapy. W pierwszym z nich rozpatrywano parametry makro- i mikrostrukturalne strug olej napędowego – etap ten wykonany został na stanowisku pozasilnikowym umożliwiającym rejestrację rozpylenia paliwa.

W drugim etapie wykonanym na stanowisku silnikowym sprawdzano w jaki sposób zmieni się stężenie podstawowych związków toksycznych i zadymienia podczas zastosowania przebadanych w etapie pierwszym rozpylaczy. Zbadano dodatkowo zmianę wymiarów i liczby cząstek stałych dla obu rozwiązań konstrukcyjnych rozpylaczy.

2. Stanowiska badawcze

Pierwszy etap badań, tj. badania wizualizacyjne wtryskiwanych strug paliwa, wykonano na specjalnie do tego celu skonstruowanym stanowisku pozasilnikowym. Podczas pomiarów rejestrowano rozpylenie paliwa z wtryskiwacza umieszczonego w komorze otwartej, w której panowały warunki otoczenia. Schemat najważniejszych elementów stanowiska przedstawiono na rysunku 1. W badaniach posłużono się m.in. systemem EVS 513D (Engine Video System) wyprodukowanym przez firmę AVL, umożliwiającym rejestrację szybkozmiennych procesów fizycznych, dzięki specjalnie do tego przygotowanej kamerze. Rejestracja zdjęć odbywa się techniką stroboskopową. Oznacza to wykonywanie kolejnych zdjęć po wielu następujących po sobie cyklach wtrysku.



Rys. 1. Schemat stanowiska do badań wizualizacyjnych procesu rozpylenia

Innym istotnym elementem stanowiska badawczego jest system elektronicznego sterowania pracą wtryskiwacza – Control CR. Układ wykorzystany został również w badaniach silnikowych. Kąt wtrysku, czas trwania impulsu elektrycznego otwarcia wtryskiwacza dla poszczególnych części dawek wtryskiwanego paliwa, jak i inne parametry pracy zadawane były za pomocą programu Engine Control, który zainstalowany był w komputerze zarządzającym systemem Control CR.

Do realizacji badań skonstruowano i wykonano mobilny układ z wysokociśnieniową pompą typu common umożliwiającą osiągnięcie ciśnienia wtrysku rzędu 200 MPa. Zastosowana nowoczesna pompa,

była napędzana pasem zębatym za pomocą silnika elektrycznego, którego prędkość obrotowa była regulowana dzięki użyciu falownika prądu przemiennego. System zbudowany został na przenośnym stelażu, co stanowi jego zaletę – możliwość przenoszenia i używania zarówno na stanowisku pozasilnikowym jak i silnikowym.

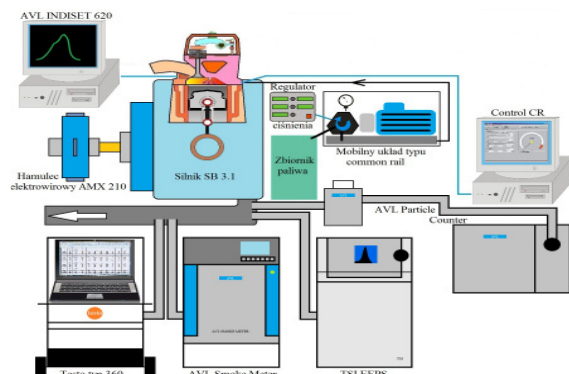
Sterowanie układem odbywało się dzięki wykonanemu na specjalnie zamówienie, elektronicznemu regulatorowi pracy układu typu common rail. Regulator, w którym zabudowano falownik prądu przemiennego służący do zmiany prędkości obrotowej silnika elektrycznego, posiada możliwość sterowania ciśnieniem wtrysku paliwa. Zadanie jest realizowane na drodze wykorzystania zaworów będących elementem pompy wysokiego ciśnienia oraz akumulatora ciśnienia.

Stanowisko posiada ponadto możliwość regulowania i utrzymywania na stałym poziomie temperatury paliwa. W tym celu wykorzystano termistorowy czujnik temperatury, za którym na przewodzie umieszczony został zawór regulacyjny, pozwalający na kierowanie paliwa w obieg grzany, bądź chłodzony. Sterowanie zaworem na podstawie wskazań termistora odbywało się w sposób automatyczny dzięki specjalnie do tego celu wykonanemu regulatorowi temperatury paliwa.

Drugi etap badań wykonano na silniku badawczym o zapłonie samoczynnym SB 3.1 połączonym z hamulcem elektrowirowym AMX 210. Wykonano pomiary stężeń toksycznych związków spalin i zadymienia. Stanowisko silnikowe składa się z następujących elementów:

- silnika badawczego SB 3.1 z hamulcem elektrowirowym AMX 210,
- mobilnego układu z wysokociśnieniową pompą typu common rail,
- elektronicznego systemu Control CR,
- systemu AVL INDISET 620 do rejestracji ciśnień szybkozmiennych,
- analizatorów spalin: Testo typ 360, AVL Smoke Meter 415S, TSI EEPS 3090, AVL Particle Counter 3790 CPC.

Schemat najważniejszych części stanowiska przedstawiono na rysunku 2. Konstrukcja silnika bazuje na częściach pochodzących z silnika SW-680 tj.: tłok z pierścieniami i sworzniem tłokowym, korbowód z panewką, tuleją cylindrową, zawory i ich napęd, wtryskiwacz i inne. W badaniach wykorzystano mobilny układ typu common rail wykorzystany również w etapie badań pozasilnikowych. Do sterowania pracą wtryskiwacza posłużono się układem Control CR również wykorzystanym w etapie wcześniejszym.



Rys.2. Schemat najważniejszych elementów stanowiska do badań silnikowych

W związku z tym, że w wykorzystanym systemie Control CR istnieje możliwość wtryskiwania dawki paliwa w dowolne położenie wału korbowego, należało monitorować przebieg ciśnienia gazów w cylindrze roboczym p_{cyl} pracującego silnika. Do zrealizowania zadania użyty został układ pomiarowy szybkozmiennych wielkości silnikowych i system akwizycji danych. Pomiary indykatorowe przeprowadzono z wykorzystaniem systemu pomiarowego AVL INDISET 620, dzięki któremu monitorowano ciśnienie gazów w cylindrze silnika p_{cyl} , ciśnienie paliwa przed wtryskiwaczem p_w , wartość natężenia prądu sterującego pracą wtryskiwacza, określającego czas jego otwarcia t_{otw} .

W etapie badań silnikowych do pomiaru stężeń podstawowych związków toksycznych wykorzystano analizator Testo typ 360. Do pomiaru zadyymienia spalin wykorzystano nowoczesny dymomierz firmy AVL model Smoke Meter 415. W badaniach wykorzystano ponadto spektrometr masowy – TSI EEPS 3090 umożliwiający precyzyjny pomiar wymiarów cząstek stałych oraz urządzenie AVL Particle Counter umożliwiające pomiar liczby cząstek stałych.

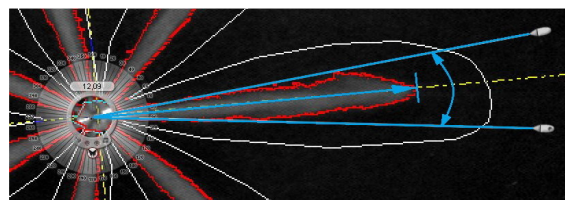
Zarówno w etapie pozasilnikowych badań wizualizacyjnych, jak i w etapie silnikowym wykorzystano wtryskiwacz elektromagnetyczny typu common rail produkcji Bosch o symbolu 0 445 110 131.

3. Wyniki badań wizualizacyjnych

Obraz – zbiór pikseli, rejestrowany w pierwszy etapie badań, i charakteryzuje się trzema podstawowymi parametrami tj. barwą (ang. *hue*), nasyceniem (ang. *saturation*) oraz jasnością (ang. *luminance*). Uważa się, iż natężenie odbitego światła jest proporcjonalne do stężenia paliwa w strudze [1]. W związku z tym podczas analizy wykonanych zdjęć brano pod uwagę tylko parametr dotyczący luminancji (L). Z tego względu rozpatrywane fotografie zostały przetransformowane do postaci monochromatycznej, a więc takiej, w której barwa oraz nasycenie przyjmują wartości zerowe, a jedynym zmiennym parametrem jest luminancja. Założono przy tym, że większe wartości L odpowiadają miej-

scom, w których mamy do czynienia z większym nagromadzeniem paliwa widocznym na wykonanym zdjęciu.

Pierwszą czynnością zrealizowaną podczas analizy było wydzielenie obszarów zawierających strugi paliwa. Następnie należało tak dobrać zakres parametru L , aby minimum wartości oznaczało granice strugi, natomiast maksimum powodowało pokrycie całej strugi, jednak bez zbytnej nadwyżki. Dobór L_{min} pozwolił na wyznaczenie konturu poszczególnych strug. Znając granicę tej warstwy można było przystąpić do pomiaru zasięgu L_s oraz kąta rozwarcia stożka α_s każdej ze strug. Zasięg (stopień penetracji) strugi jest to długość strugi w kierunku osiowym [2]. Pomiarów długości strug dokonano mierząc odcinek od otwórka rozpylacza do końca strugi, a wyniki tych pomiarów otrzymano w mm. Kąt rozwarcia stożka strugi α_s , czyli kąt wierzchołkowy strugi kropel [2] zmierzono przy użyciu programu Screen Protractor, a otrzymane wyniki podano w stopniach. Na rysunku 3 przedstawiono sposób pomiaru opisanych parametrów.



Rys. 3. Sposób pomiaru (błękitna linia) zasięgu strugi L_s i kąta stożka rozpylenia α_s

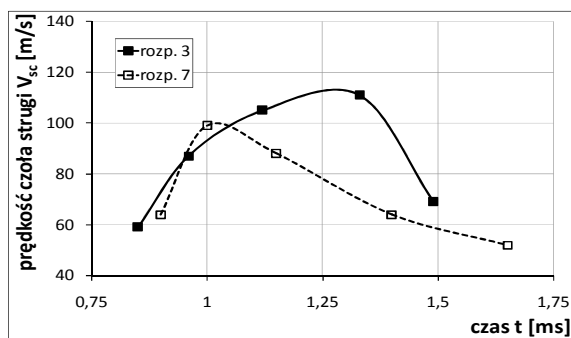
Ocena poszczególnych zdjęć miała charakter porównawczy. Pomiaru parametrów makrostrukturalnych dokonano dla każdej z sześciu strug, w każdej z siedmiu badanych mieszanin. Strugi paliw porównywano na zdjęciach odpowiadających jednakowym parametrom wtrysku (ciśnienie wtrysku p_{wtr}) oraz przy porównywalnych fazach wtrysku reprezentowanych czasem mierzonym od wysłania impulsu sterującego uniesieniem iglicy.

Na przebiegu jednego wtrysku składa się sekwencja zdjęć uzyskiwanych z krokiem równym około 0,08 ms. Dla każdego położenia wału pompy zasilającej wykonano trzy powtórzenia, tj. dla każdej fazy wtrysku uzyskano po cztery zdjęcia. W rezultacie dla jednego przebiegu wtrysku w zależności od rodzaju zastosowanego paliwa (różny czas wtrysku) uzyskiwano około 70 zdjęć.

Z zarejestrowanych zdjęć w następnym kroku wybrano te, które zostały poddane analizie – rozpatrywano 5 punktów pomiarowych każdego z wtrysków paliw. Nie analizowano zdjęć strug zarejestrowanych tuż po rozpoczęciu wtrysku, ponieważ w początkowej fazie wtrysku tj. fazie tworzenia się strugi, trudno byłoby zmierzyć jej parametry fizyczne. W związku z powyższym ocenę poddano zdjęcia po czasie około 0,1 ms od ukazania się paliwa wypływającego z rozpylacza. Dopiero od tej chwili wyraźnie można było wydzielić obszar zaj-

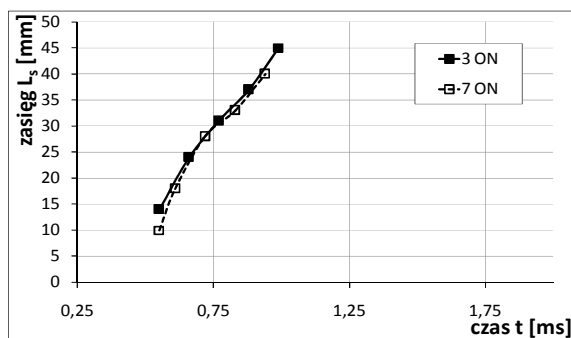
mowany przez poszczególne strugi – zarejestrowane cztery zdjęcia (powtórzenia) stanowiły pierwszy punkt pomiarowy. Ostatni punkt pomiarowy stanowiły cztery zdjęcia zarejestrowane po zaniknięciu paliwa przy rozpylaczu, czyli w chwili zablokowania kanalików przez iglicę. Punkty pomiarowe pośrednie (drugi, trzeci i czwarty) dobrano dzieląc na 4 porównywalne części zakres czasowy pomiędzy pierwszym, a ostatnim punktem pomiarowym. Łącznie z powtórzeniami wykonanymi dla każdej fazy wtrysku uzyskano do analizy każdego z procesów wtrysku 20 zdjęć.

Pierwszym porównaniem przeprowadzonym w etapie badań wizualizacyjnych było porównanie prędkości czoł strug wypływających z obu analizowanych rozpylaczy. Z analizy wynika, że przy użyciu rozpylacza 3 prędkość wzrasta i osiąga większe wartości w porównaniu do prędkości strug z rozpylacza drugiego. Jedynie na początku wtrysku zauważalny był zdecydowany wzrost prędkości podczas zastosowania rozpylacza 7. Zmianę prędkości czoł strug w czasie całego wtrysku przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Zmiana prędkości czoł strug V_{sc} wypływających z rozpylacza nr 3 i 7

Z przedstawionego wykresu zmiany zasięgu czoła strugi L_s w funkcji czasu wtrysku (rys. 5) wynika, że dłuższe strugi występowały w rozpylaczu 3 posiadającym większe średnice otworków wylotowych. Przy jego zastosowaniu, następował wzrost zasięgu o około 25%.

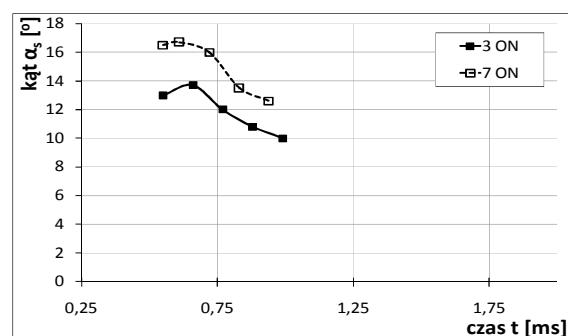


Rys. 5. Zmiana zasięgu strugi L_s w funkcji ich czasu wtrysku t zrealizowana rozpylaczami nr 3 i 7

Przy zmniejszonej średnicy otworu wylotowego rozpylacza 7 zwiększa się prędkość wypływu pali-

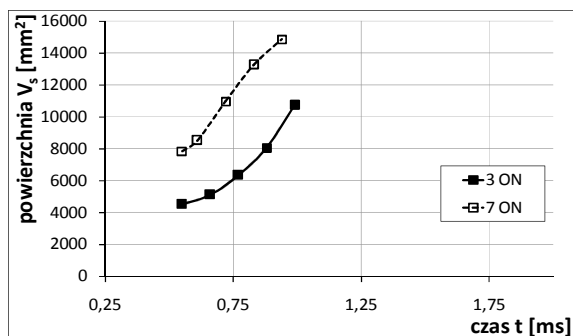
wa na krawędzi rozpylacza. Powoduje to stosunkowo szybki rozpad wtórny kropli, wzmacniany dodatkowo oporem aerodynamicznym ośrodka, do którego realizowany jest wtrysk. Zmniejszające się średnice kropli pozwalają na lepsze ich mieszanie z powietrzem. W przypadku rozpylacza 3 otwory o większych średnicach utrudniają rozbijanie paliwa na mniejsze części. Krople o zwiększonej średnicy to tym samym krople cięższe. Przekłada się to na ich energię kinetyczną, co w rezultacie zwiększa penetrację strugi. Zjawisko to uwidaczniane jest w rozpylaczu 3 wyraźnym zwiększeniem zasięgu strug paliwa, w przybliżeniu, w połowie trwania wtrysku.

W kolejnym porównaniu sprawdzano zmianę kątów rozwarcia stożków strug (rys. 6). W miarę propagacji strug, ich kąty we wszystkich przypadkach po początkowym zwiększeniu malały. Charakter przebiegu krzywych zachowany był dla obu analizowanych rozpylaczy. Większe kąty stożków strug osiągnęte były w strugach wtryskiwanych z rozpylacza 7 – w stosunku do rozpylacza 3 średnie kąty stożków strug były większe o około 25%.



Rys. 6. Zmiana kąta stożków strug α_s w funkcji ich czasu wtrysku t zrealizowana rozpylaczami nr 3 i 7

Kolejnym analizowanym parametrem makrostrukturalnym, była powierzchnia strug. Wielkość ta wiąże ze sobą zasięgi i kąty stożków strug. Założyć można, że im większa powierzchnia strugi tym lepiej paliwo miesza się z powietrzem, co bezpośrednio wpływa na emisję związków toksycznych. Porównując strugi z uwagi na zastosowany rozpylacz zauważono w każdym z paliw, że znacznie większą powierzchnią całkowitą wszystkich strug charakteryzuje się rozpylacz 7. Wynika to z faktu większej liczby otworków w tym rozpylaczu. Oprócz różnic w całkowitej powierzchni strug wypływających z rozpylaczy widoczne są również zmiany w powierzchni pojedynczych strug. W zestawieniu zamieszczonym na rysunku 7 zaobserwowano, że pojedyncze strugi wypływające z rozpylacza 7 są większe od strug tworzonych przez rozpylacz 3. Średnia powierzchnia pojedynczych strug wyliczona ze wszystkich punktów pomiarowych była około 40% większa podczas użycia rozpylacza 7. Niewątpliwie więc, zmniejszenie



Rys. 7. Zmiana powierzchni strug V_s w funkcji ich czasu wtrysku t zrealizowana rozpylaczami nr 3 i 7

średnic otworków pozytywnie wpływało na makrostrukturę strug paliwa. Dodatkowym korzystnym aspektem było zwiększenie liczby otworków w rozpylaczu, co również w zdecydowany sposób powiększało całkowitą powierzchnię wypływających strug.

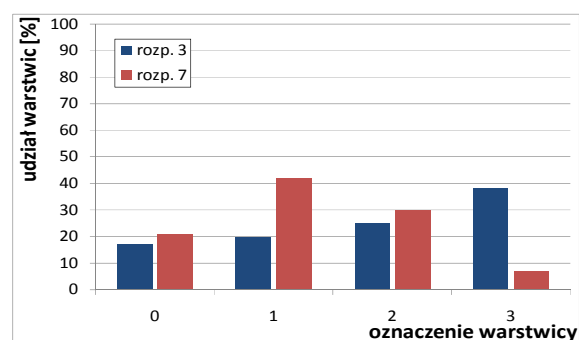
Zwiększona prędkość wypływu, którą osiągnięto na drodze zmniejszenia średnic kanałków wtryskowych, pozwalała na uzyskiwanie mniejszych kropeł, które łatwiej ulegały wymieszaniu z powietrzem. Warunki te osiągnięte przy zastosowaniu rozpylacza 7 sprzyjały zwiększaniu zarówno kątów stożków strug jak i ich powierzchni. Aby szczegółowo przeanalizować intensywność wymieszania paliwa i powietrza należało wykonać ocenę mikrostrukturalną strug. Dokonano tego w drugim etapie porównania obu rozpylaczy.

Analiza polegała na szacowaniu koncentracji paliwa wypływającego z rozpylaczy nr 3 i 7 – dzielono obraz strugi na podobszary charakteryzujące się określoną intensywnością świecenia (luminancją), czemu przypisuje się odpowiednią koncentrację paliwa.

Za pomocą programu PatEV [3] rozpatrywane zdjęcia przekształcone zostały do postaci monochromatycznej. Tak jak w przypadku badania parametrów makrostruktury (zasięgu i kąta) również tu, w ten sam sposób wydzielono granice strug i wyznaczono zakres parametru luminancji. Otrzymany zakres świecenia światłem odbitym podzielono następnie na 4 przedziały tzw. warstwy. Każda z warstw była reprezentowana na zdjęciach strugi odrębnym kolorem. Obszary o największej intensywności świecenia światłem odbitym to obszary oznaczone kolorem czerwonym (warstwa nr 3). Mniejsza intensywność świecenia była reprezentowana przez warstwę koloru żółtego (2), a jeszcze mniejsza przez kolor zielony (1). Warstwa o najmniejszych wartościach luminancji to warstwa w kolorze niebieskim (0). Program PatEV udostępnia informacje o wielkości poszczególnych warstw.

Powierzchnię czterech wydzielonych warstw zmierzono dla wtrysku z rozpylacza 3 i 7 w pięciu różnych jego fazach, przy czym dla każdego etapu procesu wykonano po cztery zdjęcia, by móc następnie ustalić średni rozmiar każdej z warstw.

Następnie dokonano porównania wielkości względnych warstw – powierzchnię, która jest objęta daną warstwą odniesiono do powierzchni całkowitej strugi i wyrażono w procentach. Operacja ta była konieczna ze względu na różne powierzchnie porównywanych strug w analizowanych etapach wtrysku, wynikające z odmiennej konstrukcji (liczba otworków) wykorzystanych rozpylaczy. Wyniki z podziałem na warstwy przedstawiono za pomocą wykresów słupkowych dla jednej fazy wtrysku $t = 0,7$ ms po wysłaniu impulsu sterującego uniesieniem iglicy (rys. 8). W przyjętym punkcie strugi paliwa były rozwinięte w sposób wystarczający do przeprowadzenia pomiaru, a przedstawiony wykres jest reprezentatywny dla całego procesu. Analiza ta pozwoliła na konfrontację wielkości warstw obu rozpylaczy w tej samej chwili wtrysku.



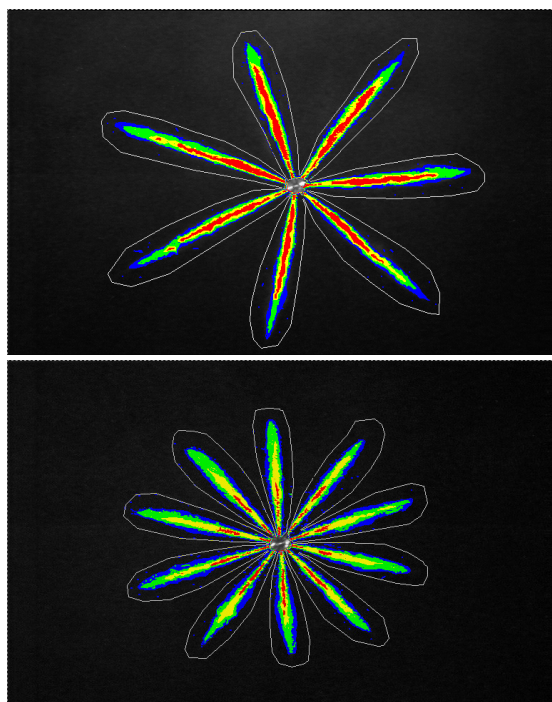
Rys. 8. Porównanie rozmiarów warstw w strugach ON generowanych w tej samej chwili wtrysku z użyciem rozpylaczy 3 i 7

Warstwa 3 charakteryzuje te obszary strugi, które posiadają największą intensywność świecenia światłem odbitym, co odpowiada największej koncentracji paliwa. Występowanie tej warstwy jest niekorzystne, gdyż świadczy o znacznym nagromadzeniu paliwa w strudze oraz nierównomierności w wymieszaniu paliwa z powietrzem. Obszary oznaczone w strudze jako warstwa nr 3 są miejscami, w których występować mogą podczas spalania lokalne niedobory tlenu.

Jak widać, na wykresie przedstawionym na rysunku 8 strugi wypływające z rozpylacza 3 charakteryzują się znacznym udziałem warstwy nr 3, podczas gdy w rozpylaczu 7 warstwa ta zajmuje zaledwie 7% całkowitej powierzchni strug. Największe udziały w strugach oleju napędowego wypływającego z rozpylacza 7 stanowiły warstwy nr 1 i 2, odpowiednio 42 i 30%. Świadczy to o dobrym wymieszaniu paliwa z powietrzem podczas użycia tego rozpylacza. Przypuszczać można, że średnia średnica kropeł jest tu mniejsza w stosunku do tych jakie tworzone są przez rozpylacz 3. Ułatwia to uzyskanie szerszego kąta rozwarcia stożka strugi, co widoczne było przy ocenie parametrów makrostrukturalnych.

We wszystkich zdjęciach strug, których powierzchnie zostały podzielone na warstwy zauwa-

żono charakterystyczne rozmieszczenie warstwic. Warstwicą charakteryzującą się największą intensywnością świecenia światłem odbitym występuje w rdzeniu strugi i jest otoczona kolejnymi warstwicami o mniejszym stopniu luminancji. Biorąc powyższe pod uwagę, większym rdzeniem charakteryzowały się strugi tworzone przez rozpylacz 3. Zauważono ponadto, że zmniejszanie minimalnej wartości parametru luminancji powoduje powiększenie rejestrowanego obszaru strugi. Zależności te widoczne są najlepiej podczas wizualnego porównania strug tworzonych przez rozpylacze. Przykładowe zdjęcia wtrysku generowanego przez rozpylacz 3 i 7 przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Przykładowe zdjęcia procesu rozpylenia ON realizowanego przez rozpylacz 3 (góra) i rozpylacz 7 (dół)

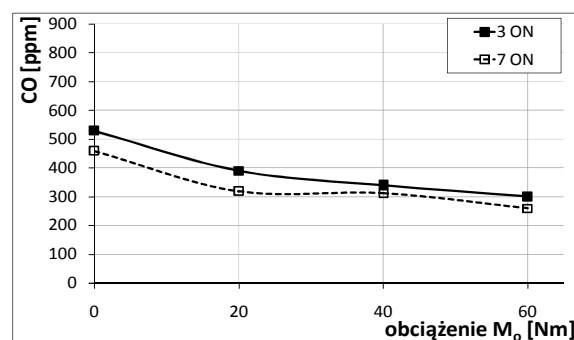
Poza zdecydowanymi różnicami w intensywności nagromadzenia paliwa w strugach zdjęcia ukazują wszystkie cechy zmierzone podczas analizy makrostruktury. Strugi rozpylacza 3 charakteryzują się większym zasięgiem, ich stożki są bardziej zwężone, a powierzchnia jest mniejsza w stosunku do powierzchni strug paliwa wtrysniętego z rozpylacza nr 7.

Podsumowując przedstawione wyniki, stwierdzić należy, że użycie rozpylacza o większej liczbie otworków rozpylających posiadających mniejsze średnice skutkowało poprawą parametrów tworzonego strug. Powierzchnia całkowita strug z uwagi na większą liczbę otworków była znacznie większa, przy czym również powierzchnia pojedynczych strug była większa w porównaniu do rozpylacza o większych otworkach. Zmianie ulegała ponadto prędkość rozchodzenia się czoł strug – malała w

przypadku zastosowania rozpylacza 7, posiadającego mniejsze średnice otworków wylotowych. Zaobserwowane zmiany związane były najprawdopodobniej z rozmiarami kropeł, co w pewnym stopniu potwierdziła analiza mikrostruktury rozpylanych strug.

4. Wyniki badań silnikowych

Pierwsza zaobserwowana w etapie silnikowym zmiana dotyczyła uzyskiwanego stężenia tlenku węgla. W miarę wzrostu obciążenia poziom stężenia tlenku węgla malał (rys. 10). Zauważono, że przy użyciu rozpylacza posiadającego większą liczbę otworków mających jednocześnie mniejsze średnice, średnie stężenie tlenku węgla było niższe – następował spadek o 13,3%.

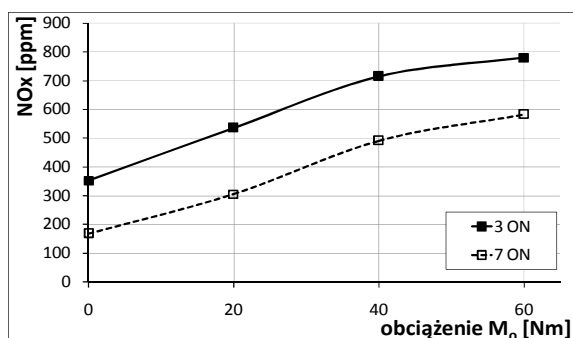


Rys. 10. Zmiana stężenia CO emitowanego przez olej napędowy przy użyciu rozpylaczy 3 i 7, w funkcji obciążenia silnika

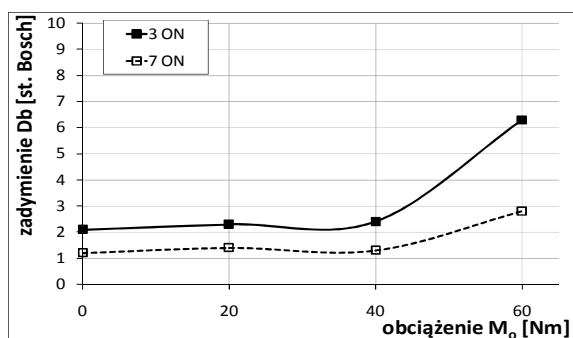
Cyklicznie powtarzające się zmiany zauważono również podczas analizy stężenia tlenków azotu (rys.11). Różnice w stosunku do tlenku węgla zaobserwowano w przebiegu linii trendu w zależności od obciążenia – przy użyciu obu rozpylaczy zauważono wzrost poziomu stężenia NO_x w miarę wzrostu obciążenia. Rozważając natomiast wpływ użytego rozpylacza zauważono, że dla wszystkich paliw następował spadek poziomu stężenia tlenków azotu przy użyciu rozpylacza 7. Różnica stężenia tlenków azotu z uwagi na zastosowany rozpylacz wyniosła 35,1%.

Również w przypadku analizy stopnia zadymienia zaobserwowano pewne powtarzające się prawidłowości (rys. 12). Zadymienie dla małych i średnich obciążeń miało porównywalne wartości, rosło natomiast dla najwyższego wygenerowanego w badaniach obciążenia.

Odnotowano spadek poziomu zadymienia w przypadku stosowania rozpylacza o większej liczbie otworków posiadających mniejsze średnice. W stosunku do rozpylacza 3 zastosowanie rozpylacza 7 pozwoliło na znaczny spadek średniego zadymienia o 48,8%.



Rys. 11. Zmiana stężenia NO_x emitowanego przez olej napędowy przy użyciu rozpylaczy 3 i 7, w funkcji obciążenia silnika



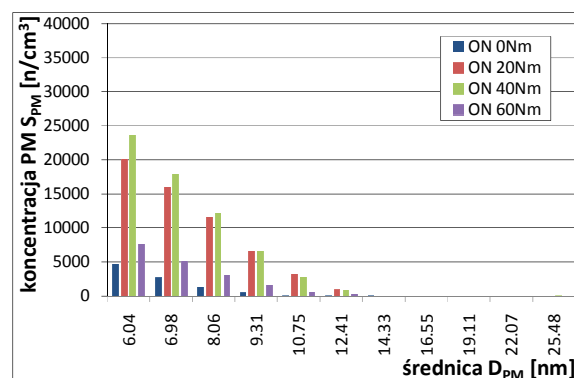
Rys. 12. Zmiana zadymienia D_b emitowanego przez olej napędowy przy użyciu rozpylaczy 3 i 7, w funkcji obciążenia silnika

Przeprowadzone pomiary stopnia zadymienia są badaniami prostym w wykonaniu, uniwersalnymi i pozwalającymi na szybkie porównanie zadymienia silnika przy zasilaniu dwoma paliwami. Z uwagi na charakter wykonywanych pomiarów, badania tego typu należy uznać za poglądowe. Ze względu na ekologię większe znaczenie niż zadymienie ma zawartość cząstek stałych w spalinach. Należy również podkreślić, że od kilku lat zwraca się uwagę nie tylko na wielkość masowej emisji cząstek, ale również na ich wymiary. Stwierdzono bowiem, że silniki wysokoprężne, a także silniki o bezpośrednim wtrysku benzyny do cylindra, emitują większość cząstek o wymiarach poniżej 100 nanometrów – tzw. nanocząstki. Mimo, że masa takich cząstek w całkowitej masie cząstek emitowanych z silnika jest bardzo mała, to ich niewielkie wymiary powodują, że nanocząstki są bardzo niebezpieczne dla zdrowia [4].

Stężenie cząstek stałych S_{PM} z podziałem na ich rozmiary badano w zależności od obciążenia silnika, jak również rodzaju zastosowanego rozpylacza. Czas każdego z pomiarów był taki sam w celu zachowania sensu porównawczego badania. Średnice cząstek stałych D_{PM} z uwagi na rozmiar podzielone zostały na przedziały, a każdy z nich opisany został średnią średnicą PM, której wartość zamieszczono na osi odciętych.

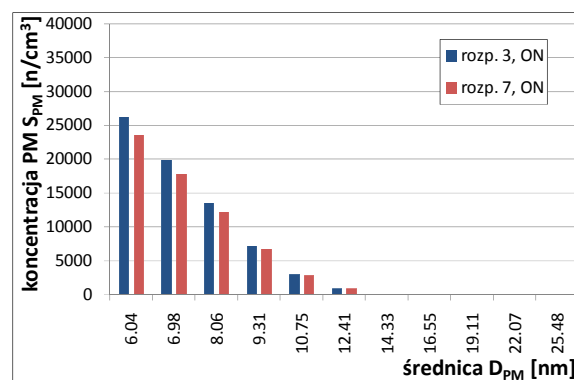
Na rysunku 13 przedstawiono widmo stężeń cząstek stałych S_{PM} w funkcji ich średnic D_{PM} w zależności od stopnia obciążenia silnika zasilanego

ON przy użyciu rozpylacza 7. Z analizy wykresu zaobserwować można, że średnice cząstek stałych, niezależnie od obciążenia silnika, zawierają się w przedziale 6,04 – 12,41 nm. Pozostałe wymiary są nieznaczne. Zauważono tym samym, że wraz ze wzrostem średniej średnicy cząstek stałych maleje ich stężenie. Z uwagi na obciążenie zaobserwowano, że największe średnice cząstek stałych odnotowywane były przy średnich obciążeniach (20 i 40 Nm). Przy pracy silnika na biegu luzem, jak również dla maksymalnych przyjętych w pomiarach wartości obciążenia, stężenie PM miało w każdym zakresie średnic zbliżone wartości.



Rys. 13. Widmo stężeń cząstek stałych S_{PM} w funkcji ich średnic D_{PM} w zależności od stopnia obciążenia silnika zasilanego ON przy użyciu rozpylacza 7

Z uwagi na zachowanie charakteru zmian w każdym z obciążeń silnika, dalszą część analizy zaprezentowano na przykładzie pomiarów wykonanych pod obciążeniem wynoszącym 40 Nm. Zamieszczony na rysunku 14 wykres reprezentatywny dla pozostałych wartości obciążeń silnika. Na rysunkach przedstawiono porównanie widm stężeń cząstek stałych S_{PM} w funkcji ich średnic D_{PM} dla silnika zasilanego olejem napędowym za pomocą rozpylaczy 3 i 7. Zaobserwowano, że zastosowanie rozpylacza 7 umożliwiło zmniejszenie średnich średnic cząstek stałych. Zjawisko to

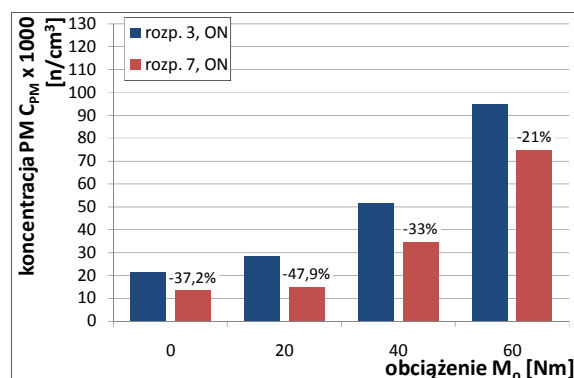


Rys. 14. Widmo stężeń cząstek stałych S_{PM} w funkcji ich średnic D_{PM} dla silnika obciążonego momentem $M_o = 40$ Nm, zasilanego ON przy użyciu rozpylaczy 3 i 7

pokrywa się tym samym ze zmniejszeniem zady-
mienia jakie odnotowano w przypadku użyciu tego
rozpylacza. Wartości redukcji średnich średnic PM
wahały się w granicach 0 – 15% w stosunku do D_{PM}
otrzymywanych przy zastosowaniu rozpylacza 3.

Poza opisanymi pomiarami wielkości cząstek
stałych, w badaniach podjęto próbę oceny ich li-
czebności w zależności od obciążenia, jak również
użytego rozpylacza. W każdej z wymienionych
konfiguracji przez 2 minuty mierzono liczebność
PM w spalinach, którą następnie przedstawiono
jako średnią liczbę cząstek stałych w stosunku do
objętości pomiarowej (cm^3). Uśrednienie pomiaru
jest więc korzystniejszym sposobem przedstawienia
wyników badań w stosunku do pomiarów chwilo-
wego stopnia zadywienia.

Z analizy liczebności cząstek stałych zareje-
strowanej podczas badań można zaobserwować jej
zwiększanie się wraz ze wzrostem stopnia obciąże-
nia silnika (rys. 15). Systematyczny wzrost liczby
cząstek stałych jest bardziej wyraźny w stosunku do
zmian zarejestrowanych w przypadku stopnia za-
dymienia spalin. Różnice te wynikają najprawdo-
podobniej z charakteru oraz dokładności obu po-
miarów.



Rys. 15. Zmiana liczby cząstek stałych C_{PM} w spalinach emitowanych przez ON przy użyciu rozpylaczy 3 i 7, w funkcji obciążenia silnika

Analiza wpływu rodzaju zastosowanej kon-
strukcji rozpylacza na liczebność cząstek stałych

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

PatEV Picture Analysis and Transformation for
Engine Video-Observation – numeryczny
program do analizy zdjęć procesów silniko-
wych

HSL Hue Saturation Luminance – parametry pik-
sela: barwa, nasycenie, jasność

Bibliography/Literatura

- [1] Tindal M., Williams T., Harcombe A.: Fuel spray formation in an experimental swirl chamber. SAE paper 870451.
[2] Orzechowski Z., Prywer J.: Rozpylanie ciecży. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1991.

- [3] Wisłocki K.: Studium wykorzystania badań optycznych do analizy procesów wtrysku i spalania w silnikach o zapłonie samoczynnym. Rozprawa nr 387, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004.

[4] Zabłocki M., Ekert K.: Emisja nanocząstek nowym wyzwaniem dla silników z zapłonem samoczynnym. Materiały konferencji

Ekodiesel '98. Prace Instytutu Lotnictwa, Warszawa 1998.

Dr hab. inż. Marek Idzior – profesor nadzw. na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej

Mr Marek Idzior, DSc, DEng. – professor in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology



Dr inż. Wojciech Karpiuk – asystent na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej

Mr Wojciech Karpiuk, Ph.D., Mech. Eng. – doctor in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology



Dr inż. Maciej Bajerlein – adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej

Mr Maciej Bajerlein, Ph.D., Mech. Eng. – doctor in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology



Mgr inż. Paweł Daszkiewicz – doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej

Mr Paweł Daszkiewicz, MEng. – postgraduate in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology



Mgr inż. Paweł Stobnicki – doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej

Mr Paweł Stobnicki – MEng. – postgraduate in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology

